

**Milan MORAVČÍK<sup>1</sup>, Martin MORAVČÍK<sup>2</sup>**

**DYNAMICKÉ VLASTNOSTI SPOJITÉHO MONOLITICKÉHO PREDPĚTÉHO  
BETONOVÉHO MOSTA**

**DYNAMIC PROPERTIES OF THE MONOLITHIC PRESTRESSED  
CONCRETE CONTINUOUS BRIDGE**

**Abstrakt**

Prezentujú sa dynamické vlastnosti novovybudovaného 14-polového spojitého mosta z predpätého betónu na rýchlostnej ceste R1 v Slovenskej republike v úseku Nitra – Selenec. Popisuje sa dynamická testovacia procedúra, metódy vyhodnocovania a spracovanie meraných časových priebehov kinematických veličín – vertikálnych a horizontálnych posunov, pomerných pretvorení získaných pri vynútenom kmitaní mosta od účinku pohyblivého skúšobného zaťaženia, aj od rázových účinkov na konštrukciu mosta.

**Kľúčová slova**

Dynamika mostov, experimentálne metódy, frekvenčná analýza časových signálov.

**Abstract**

Dynamic properties of the newly built 14-pole continuous prestressed concrete bridge in the Slovak highway R1 in section Selenec – Beladice is presented. Dynamic test procedures, methods of evaluating and processing of measured time record of kinematic quantities – vertical and horizontal displacements and strains obtained during the forced vibration of the bridge from the effect of the moving test load, and the shock effects on the structure of the bridge are described.

**Keywords**

Dynamics of bridges, experimental methods, frequency analysis of time signals.

## **1 ÚVOD**

Novovybudovaná časť rýchlostnej cesty R1 Nitra – B. Bystrica realizovaná v rokoch 2009-2011 je vybudovaná ako viacpruhová smerovo rozdelená komunikácia charakteristická množstvom mostných konštrukcií rôznych rozpätí a rôznych konštrukčných riešení. Na najväčších mostoch s rozpätím polí  $L > 60$  m sa v zmysle ČSN 73 6209 „Zaťažovacie skúšky mostov“ [3] vykonali aj dynamické zaťažovacie skúšky. Tento príspevok je venovaný dynamickým skúškam jednému z dvoch najväčších mostov na 2. úseku rýchlostnej komunikácie R1 v lokalite Selenec – Beladice pracovne značený ako objekt SB 203.

Nosnú konštrukciu objektu SB 203 tvoria dva samostatné mosty pre smer Nitra – Zvolen a smer Zvolen – Nitra, ktoré sú uložené na samostatných podperách (pilieroch s výškou od  $12\text{ m} \div 28\text{ m}$ ). Technológia výstavby je letná montáž zo segmentov dĺžky 2,23 m. Celková dĺžka mosta je  $L = 763,5\text{ m}$  ( $33,5 + 48 + 9 \times 61 + 48 + 33,5\text{ m}$ ). Smerovo aj výškovo je most v oblúku, obr.1.

---

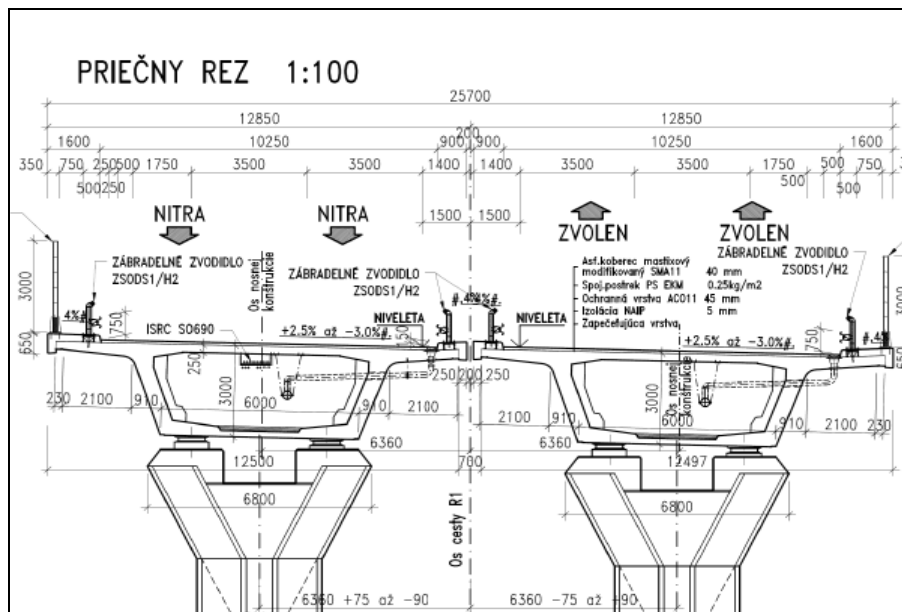
<sup>1</sup> Prof. Ing. Milan Moravčík, CSc, Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta ŽU v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, e-mail: milan.moravcik@fstav.uniza.sk.

<sup>2</sup> Doc. Ing. Martin Moravčík, PhD, Katedra stavebných konštrukcií a mostov, Stavebná fakulta ŽU v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, e-mail: martin.moravcik@fstav.uniza.sk.



Obr. 1: Pohľad na merané mosty objektu SB 203 v úseku Selenec - Beladice

V priečnom reze nosnú konštrukciu mostov tvorí jednokomorový nosník výšky 3 m, šírka hornej dosky 12,25 m, šírka dolnej dosky 6,0 m. Hrúbka trámov je konštantná 500 mm, hrúbka dolnej dosky je 200 mm obr.2.



Obr. 2: Priečný rez konštrukcie mostov objektu SB 203

Dynamické skúšky mostov objektu SB 303 a vyhodnocovanie nameraných signálov vykonal kolektív pracovníkov Katedry stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta Žilinskej univerzity.

## 2 CIEĽ A ROZSAH DYNAMICKÝCH ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK

Poznanie dynamického chovania, resp. overenie dynamických vlastností významných konštrukcií po ich vybudovaní predstavuje dôležitý krok spoľahlivého prevádzkovania konštrukcie v budúcnosti. Cieľom zaťažovacích skúšok predmetného mosta je:

- Overenie predpokladaných vlastností nosnej konštrukcie mosta pre aplikované dynamické zaťažovanie (náchylnosť k rezonančnému rozkmitávaniu mosta, nosné frekvencie kmitania a pod.).
- Overenie predpokladanej tuhosti nosnej konštrukcie pre rôzne typy dynamického namáhania (prejazdy ťažkých zaťažovacích vozidiel, vplyv nerovnosti vozovky, dynamické zaťaženie rázového typu).
- Splnenie požiadaviek STN 73 6209: Zaťažovacie skúšky mostov [3] ktoré sa vyžadujú pre mosty s rozpätím polí  $L_i > 50 \text{ m}$ , alebo pri dĺžke spojitých konštrukcií  $L > 80 \text{ m}$ .

Zaťažovacie vozidlo pre dynamické zaťažovacie skúšky sa volilo štandardne ťažké nákladné vozidlo (štvornápravové vozidlo Mercedes Benz typu Actroc 4141/8x6 celkovej hmotnosti plne naloženého vozidla  $m_G = 32 \text{ t}$ ).

Vyššie uvedené požiadavky pre hodnotenie dynamickej odozvy mosta sa aplikujú viacerými spôsobmi, obvyčajne ako dynamická odozva pre:

- hladké prejazdy ťažkého skúšobného vozidla rýchlosťami  $c = 5 \div 80 \text{ km/h}$ ,
- prejazdy skúšobného vozidla cez normovú prekážku (opakované rázové zaťaženie mosta) rýchlosťami prejazdu  $c = 5 \div 80 \text{ km/h}$ ,
- rozkmitávanie mosta umelo vyvolaným rázom v charakteristických miestach mosta.

Dynamická odozva mosta, vzhľadom na rozsiahlosť konštrukcie (14-polový most o celkovej dĺžke  $L = 763,5 \text{ m}$ ), sa realizuje a vyhodnocuje meraním odozvy vo vybraných poliach mostnej konštrukcie (merané charakteristické polia č.6 a č.7 s najväčšími rozpätiami  $L_6 = L_7 = 61 \text{ m}$ ). Pri meraní dynamickej odozvy mosta boli použité tri typy snímačov:

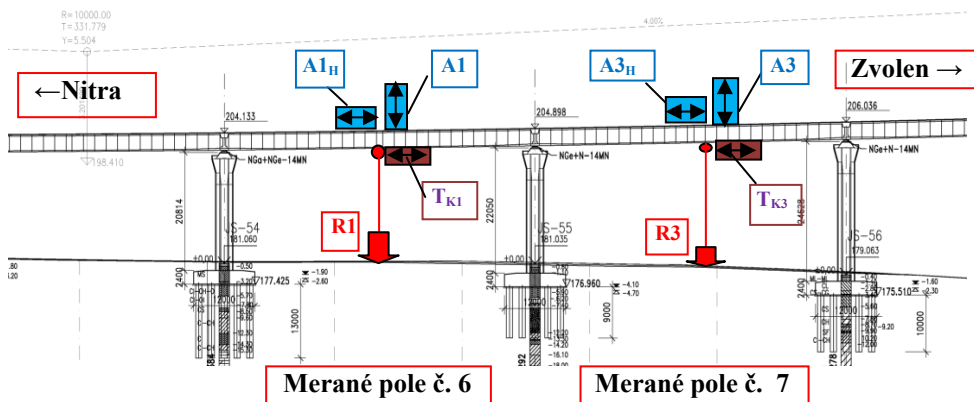
- priechybomery ( $R$ ) – indukčné snímače *Bosh*, osadené v  $\frac{1}{2}$  rozpätia meraných polí,
- akcelerometre ( $A$ ) – typ BK 4500 v režime snímání výchyliek, osadené v  $\frac{1}{2}$  rozpätia meraných polí na hornej strane mostovky,
- tenzometre ( $Tk$ ) – typ Kistler osadené v  $\frac{1}{2}$  rozpätia meraných polí na spodnej strane mostovky.

Rozmiestnenie snímačov je schematicky zakreslené na obr.3. Snímače synchronne merali kinematické veličiny kmitania mosta a pomerné pretvorenia v časovej oblasti, vzorkovacia frekvencia meraných signálov  $f_s=1000$  Hz.

## 2.1 Merané parametre pri dynamickej skúške

Základný normový prístup dynamických zaťažovacích skúšok cestných mostov v SR udáva norma [3]. Norma vyžaduje hodnotiť dynamické účinky a dynamické chovanie mosta cez namerané amplitúdy  $Y_{(obs)}$  dynamických veličín → zrýchlenia  $w''(x,t)$ , výchylky  $w(x,t)$ , pomerné pretvorenia  $\varepsilon(x,t)$ . Rozhodujúce parametre dynamickej skúšky sa z nich vyhodnocujú ako:

- dynamický súčiniteľ  $\delta_{dyn}$ ,
- logaritmický dekrement útlmu  $\mathcal{G}$ ,
- dynamická účinnosť zaťaženia  $\eta_{dyn}$ ,
- dominantné frekvencie  $f_{(i)}$  kmitania mosta.



Obr. 3: Snímače v meraných poliach č. 6 a č.7 na moste Nitra → Zvolen

### • Dynamický súčiniteľ $\delta_{obs}$

Dynamický súčiniteľ  $\delta_{obs}$  sa vyhodnocuje z časových priebehov meraných statických veličín

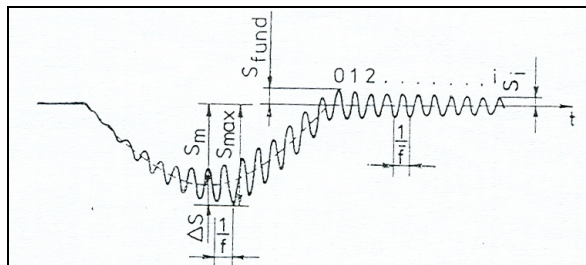
- priebehov  $w(x,t)$  a pomerných pretvorení  $\varepsilon(x,t)$  v charakteristických miestach konštrukcie na základe všeobecného vzťahu v zmysle obr.4:

$$\delta_{obs} = \frac{S_{max,dyn}(t)}{\bar{S}_x} \quad (1)$$

kde:

$S_{max,dyn}(x)$  je najväčšia nameraná dynamická pretvárná veličina v meranom mieste konštrukcie ( $x$ ) pri prejazdoch skúšobného vozidla.

$S_m(x)$  je najväčšia hodnota pretvárnej veličiny v meranom mieste ( $x$ ), od staticky pôsobiaceho skúšobného vozidla v najúčinnejšej polohe (stred mosta), alebo pohybujúceho sa krokovou rýchlosťou po moste.



Obr. 4: Interpretácia dynamického súčiniteľa  $\delta_{obs}$  podľa normy [4]

Nakoľko dynamický súčiniteľ  $\delta_{obs}$  môže byť vyhodnocovaný rôznymi prístupmi - z merania rôznych kinematických veličín (z dynamických prieťahov  $w(x,t)$ , dynamickej zložky vertikálneho kmitania  $\Delta w(x,t)$ , dynamických pomerných pretvorení  $\varepsilon(x,t)$ ), potom aj vyhodnotený súčiniteľ  $\delta_{obs}$  nemajú úplne rovnaké hodnoty, čo treba zohľadňovať a správne interpretovať. Pri dynamických skúškach predmetného mosta súčiniteľ  $\delta_{obs}$  bol vyhodnocovaný:

1/ Z nameraných dynamických prieťahov  $\hat{w}_x(x,t)$ , v strede meraných polí mosta - 6. podľa  $\hat{w}_{(s_6)}(t)$ , resp. podľa č. 7:

$$^{(w)}\delta_{x,obs} = \frac{\hat{w}_{\max,dyn}(t)}{\bar{w}_{(x)}} \quad (2.a)$$

kde:

$\bar{w}_{(x)}$  je spriemerovaná najväčšia hodnota prieťahu  $w_{(x)}$  v meranom mieste (x), od staticky pôsobiaceho skúšobného vozidla v najúčinnejšej polohe (stred mosta), alebo vozidla pohybujúceho sa krokovou rýchlosťou po moste.

2/ Z nameraných dynamických pomerných pretvorení  $\hat{\varepsilon}(x,t)$ :

$$^{(Tk)}\delta_{x,obs} = \frac{\hat{\varepsilon}_{x,\max,dyn}(t)}{\bar{\varepsilon}_{(x)}} \quad (2.b)$$

3/ Kombinovaný dynamický súčiniteľ  $^{komb}\delta_{obs}$  vyhodnocovaný podľa vzťahu:

$$^{(komb)}\delta_{x,obs}^{(Ri)} = \frac{\hat{w}_{\max,dyn}(t)}{\bar{w}_{x,stat}} = \frac{\hat{w}_{(x)}(t) + \Delta w_{(x)}(t)}{\bar{w}_{x,stat}} \quad (2.c)$$

kde:

$\bar{w}_{(x)}$  je spriemerovaná najväčšia hodnota prieťahu  $w_{(x)}(t)$  v meranom mieste (x), od staticky pôsobiaceho skúšobného vozidla v najúčinnejšej polohe, alebo „spriemerovaná hodnota“ dynamického prieťahu  $w(x,t)$ .

$\Delta w_{(x)}(t)$  je dynamická zložka vertikálneho prieťahu  $w(x,t)$ .

#### ▪ Logaritmickej dekrement útlmu $\mathcal{G}$

Logaritmickej dekrement útlmu sa vyhodnocuje z dokmitávania mosta, po opustení vozidla z mosta a vyhodnocuje sa na základe vzťahu:

$$\mathcal{G} = \frac{1}{i} \ln \frac{S_1(x,t)}{S_i(x,t)} \quad (3)$$

kde:

$S_I(x,t)$  je základná (prvá odčítavaná amplitúda meranej veličiny, napríklad snímaného kmitania  $w(x,t)$  nezaťaženj mostnej konštrukcie.

$S_i(x,t)$  je i-ta odčítavaná amplitúda počítaná od základnej amplitúdy  $S_I$ .

#### ▪ Frekvencie kmitania mosta

Frekvenčná skladba vynúteného kmitania mosta predstavujú dôležitý parameter, ktorý sa porovnávajú s vlastnými frekvenciami vlastného kmitania mosta  $f_{(i)teor}$  a nameranými frekvenciami  $f_{(i)obs}$  pri dynamickej skúške, pričom frekvenčná skladba sa vyhodnocuje:

- pre vertikálne kmitanie mosta,
- pre horizontálne kmitanie mosta.

Frekvenčná skladba kmitania sa vyhodnocuje pri prejazdoch ťažkého skúšobného vozidla rôznymi rýchlosťami. Určujú sa dominantné frekvencie vynúteného kmitania mosta  $f_{(i)obs}$ , ale aj frekvencie voľného dokmitávania nezaťaženého mosta  $f_{(i)dok}$ , po výjazde vozidla z mosta. Tieto frekvencie sa porovnávajú s teoreticky vypočítanými frekvenciami kmitania mosta – vlastnými frekvenciami  $f_{(i)}$  nezaťaženého aj zaťaženého mosta a určuje sa náchylnosť kmitania k vlastným tvarom kmitania, resp. náchylnosť rezonančného rozkmitávania mosta.

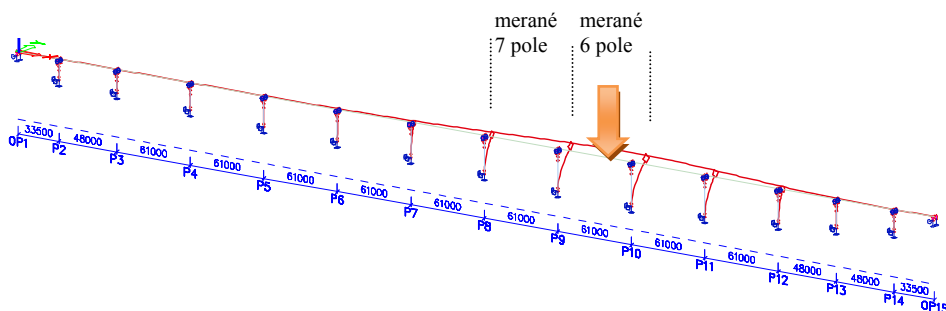
Vlastné frekvencie a tvary kmitania od vlastnej tiaže mosta + vozidlo 32 t umiestnené v 6. poli mosta sú pre najnižšie vertikálne tvary kmitania Tab. 1.1 a Tab. 1.2 a na obr.6.

Tab. 1: Prvých 20 vlastných frekvencií kmitania mosta od vlastnej tiaže mosta + tiaže vozidla  $m_v=32$  t umiestneného v 6. poli mosta

Vlastný tvar	Frekvencia kmitania $f_i$ [Hz]	Kruhová frekvencia $\omega_i$ [1/s]	Periódá kmitania $T_i$ [s]	Tvar kmitania
1	0.46	2.87	2.19	Horizontálny tvar
2	0.74	4.64	1.35	Horizontálny tvar
3	0.96	6.04	1.04	Horizontálny tvar
4	1.15	7.24	0.87	Horizontálny tvar
5	1.36	8.52	0.74	Horizontálny tvar
6	1.60	10.05	0.63	Horizontálny tvar
<b>7</b>	<b>1.67</b>	<b>10.48</b>	<b>0.6</b>	1. Vertikálny tvar
<b>8</b>	<b>1.78</b>	<b>11.19</b>	<b>0.56</b>	2. Vertikálny tvar
9	1.87	11.78	0.53	Priestorový tvar
<b>10</b>	<b>1.95</b>	<b>12.28</b>	<b>0.51</b>	3. Vertikálny tvar
<b>11</b>	<b>2.16</b>	<b>13.58</b>	<b>0.46</b>	4. Vertikálny tvar
12	2.18	13.67	0.46	Priestorový tvar
13	2.22	13.97	0.45	Priestorový tvar
14	2.25	14.17	0.44	Priestorový tvar
<b>15</b>	<b>2.42</b>	<b>15.18</b>	<b>0.41</b>	5. Vertikálny tvar
16	2.49	15.65	0.4	Priestorový tvar
17	2.52	15.83	0.4	Priestorový tvar
18	2.61	16.37	0.38	Priestorový tvar
<b>19</b>	<b>2.67</b>	<b>16.76</b>	<b>0.37</b>	Vertikálny tvar
20	2.92	18.32	0.34	Priestorový tvar

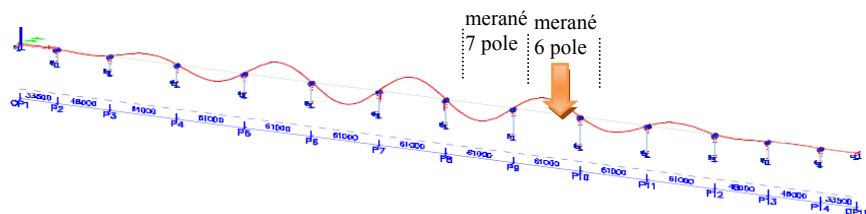
Charakter niektorých teoreticky určených vlastných tvarov kmitania mosta je ukázaný na obr. 5 ÷ 7.

- **2. vlastný tvar kmitania mosta** ( $f_2=0,74$  Hz) → 2. horizontálny tvar kmitania mosta od vlastnej tiaže mosta  $m_G$  + tiaže vozidla  $m_v = 32$  t umiestnené v 6 poli mosta.



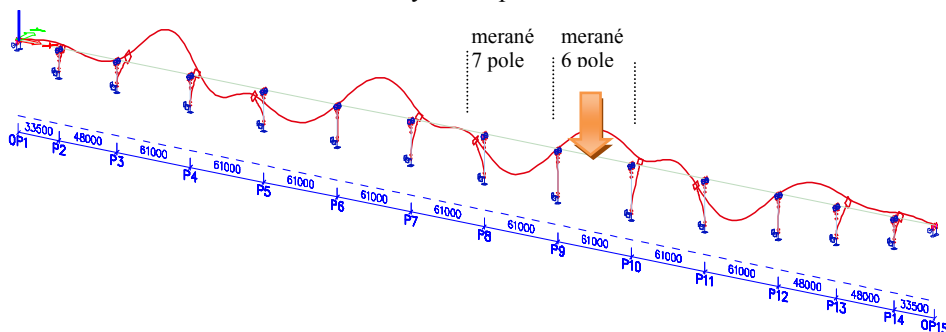
Obr. 5: Druhý tvar kmitania mosta ( $f_2=0,74$  Hz).

- **7. vlastný tvar kmitania mosta** ( $f_7=1,67$  Hz) → 1. vertikálny tvar kmitania mosta od vlastnej tiaže mosta  $m_G$  + tiaže vozidla  $m_v = 32$  t umiestnené v 6 poli mosta.



Obr. 6: Siedmy vlastný tvar kmitania mosta ( $f_7=1,67$  Hz).

- **12. vlastný tvar kmitania mosta** ( $f_{12}= 2,18$  Hz) → Priestorový tvar kmitania mosta so zaťažovacím vozidlom umiestneným v 6. poli mosta.



Obr. 7: Dvanásť vlastný tvar kmitania mosta ( $f_{12}= 2,18$  Hz) .

Z vykonanej teoretickej analýzy vlastného kmitania mosta pomocou použitého rovinného výpočtového modelu mosta môžeme konštatovať:

- Prvých 5 vlastných tvarov kmitania predstavuje horizontálne kmitanie mostovky na pilieroch. Napríklad na obr.5 je prezentovaný 2. horizontálny vlastný tvar kmitania mosta.
- Tvary kmitania odpovedajúce vlastným frekvenciám  $f_6 \div f_{20}$  predstavuje priestorové kmitanie mosta (kombinácia vodorovného a vertikálneho kmitania mostovky) s nosným vertikálnym kmitaním mostovky nachádzajúcim sa vo frekvenčnom pásme  $f_i = 1,6 \div 2,92$  Hz. Na obr.6 je prezentovaný 7. vlastný tvar kmitania, ktorý je 1. vertikálny tvar kmitania mosta. Na obr.7 je ukázaný priestorový tvar kmitania mosta s prevládajúcim vertikálnym kmitaním.



- Priestorové tvary kmitania mostovky, aj vertikálne tvary kmitania mostovky majú podobné tvary, ktoré sa líšia len amplitúdami max. rozkmitu v strede jednotlivých polí, pričom každé pole kmitá v jednoduchom tvare – s uzlovými bodmi kmitania nachádzajúcimi sa nad podperami.

### 3 MERANIE DYNAMICKEJ ODOZVY V SMERE MOSTA NITRA-ZVOLEN

Vykonal sa samostatné dynamické skúšky pre oba mosty. Dynamická odozva mosta (N→Z) sa merala v charakteristických najväčších poliach č. 6 a č.7 mosta, dĺžky  $L = 61\text{ m}$  v príslušnom smere prejazdu skúšobným vozidlom. Detailná modálna analýza kmitania mosta nebola vyhodnocovaná vzhľadom na veľkosť mostnej konštrukcie a z nej vyplývajúcu náročnosť experimentálneho riešenia.

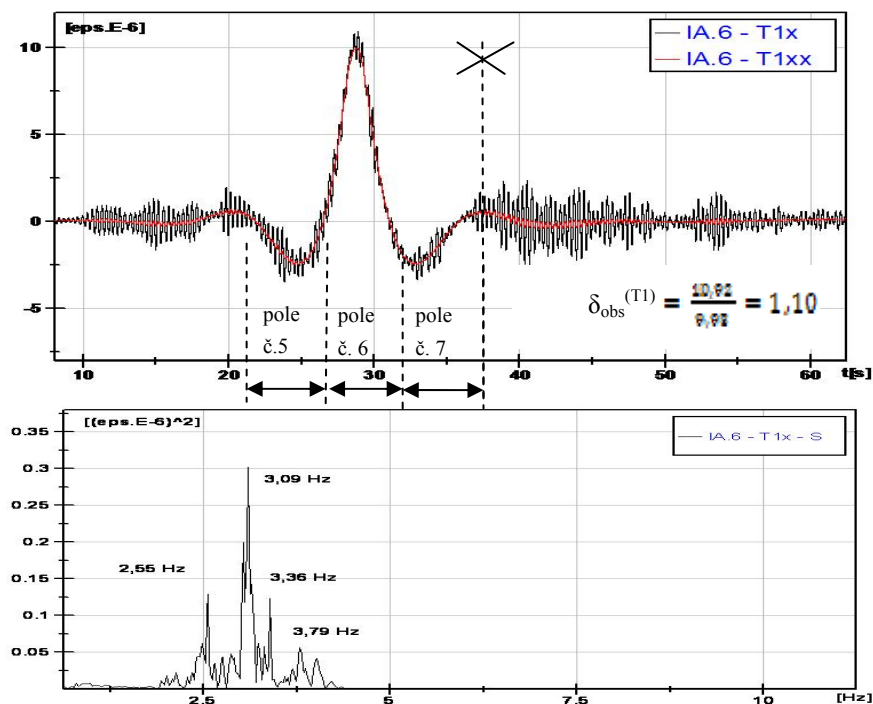
Experimentálne sa skúšalo vynútené kmitanie mosta - dynamické chovanie mosta pre tri dôležité typy dynamického budenia mosta:

- hladké prejazdy skúšobného vozidla rýchlosťami  $5 \div 80\text{ km/h}$ ,
- prejazdy skúšobného vozidla cez normovú prekážku rýchlosťami  $5 \div 80\text{ km/h}$ ,
- rozkmitávanie mosta rázom zadnej nápravy vozidla v strede poľa č.6 a č.7 z výšky 0,1 m.

#### 3.1 Hladké prejazdy skúšobného vozidla (N→Z)

Všetky záznamy prejazdov skúšobného vozidla sa realizovali stredom vozovky na moste Nitra – Zvolen rýchlosťami od  $10 - 80\text{ km/h}$ . Súbor merania sa označovali v tvare  $I-A,B,C,j\_Xi$  (A-hladké jazdy, B-jazdy cez prekážku, C-rázové zaťaženie mosta). Typické časové priebehy kmitania pri prejazde vozidla poľami č.5 ÷ č.7 mosta a ich frekvenčná skladba vyhodnocovaná v poli č. 6 sú prezentovaná na obr. 8 ÷ 9.

- Časový priebeh dynamického pomerného pretvorenia  $\varepsilon_{(s6)}(t) \rightarrow$  snímač  $T_{kl}$  a jeho frekvenčná skladba – súbor  $I-A.6\_Tl-x$ , rýchlosť jazdy  $50\text{ km/h}$ , obr.8.

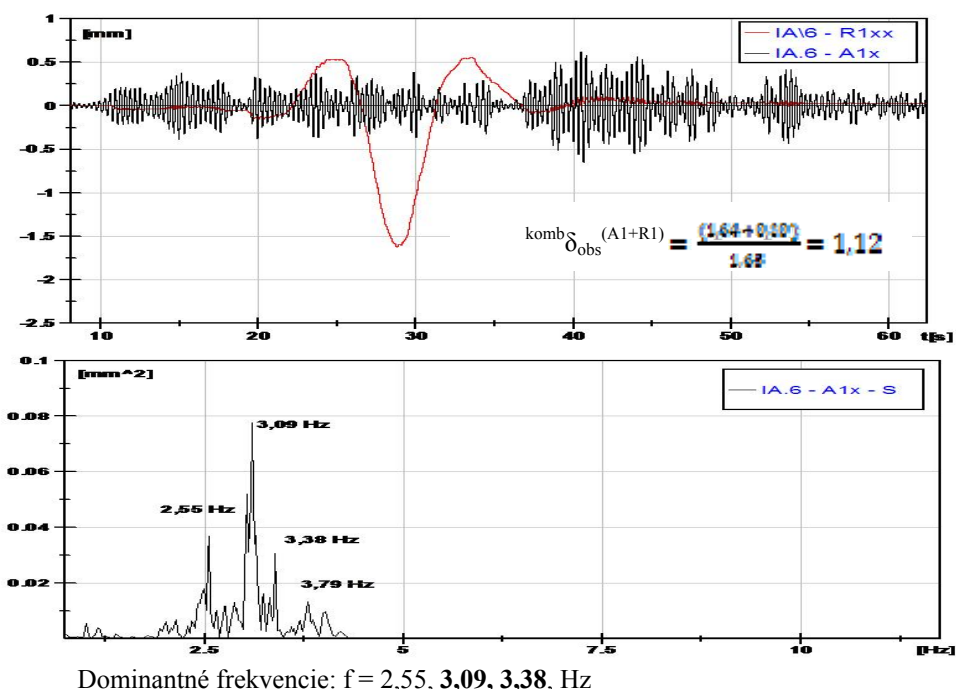


Dominantné frekvencie:  $f = 2,55, 3,09, 3,36, \text{ Hz}$

Obr. 8: Analýza súboru  $I-A.6\_Tl-x \rightarrow \varepsilon_{(s6)}(t)$  v strede 6. poľa mosta a jeho frekvenčná skladba



- Časový priebeh dynamickej zložky vertikálneho kmitania  $\Delta w_{(s6)}(t) \rightarrow$  snímač  $A_I$  a jeho frekvenčná skladba – súbor  $I-A.6\_A1-x$ , rýchlosť jazdy 50 km/h, obr.9.



Obr. 9: Analýza súboru  $I-A.6\_A1-x \rightarrow$  Dynamická zložka priehybu  $\Delta w_{(s6)}(t)$  v strede 6. poľa

Kmitania mostovky pri všetkých prejazdov vozidla malo rovnaký charakter (obr.8, 9). Hlavné výsledky hladkých prejazdov skúšobného ťažkého vozidla hmotnosti  $m=32$  t možno zhrnúť nasledovne:

1/ Meraný dynamický súčiniteľ  $\delta_{obs}$ , vyhodnocovaný z merania troch nezávislých veličín v charakteristických prierezoch polí mosta ( $w_{(s6)}(t)$ ,  $\varepsilon_{(s6)}(t)$ ,  $\Delta w_{(s6)}(t)$ ), dosahuje hodnoty, ktoré sa len mierne líšia a v závislosti na rýchlosti prejazdu (kvalitný a rovný povrch vozovky):

- pre 50 km/h  $\rightarrow \delta_{obs}^{(T1)} = 1,10$ ,  $\delta_{obs}^{(R1)} = 1,08$ ,  $^{komb} \delta_{obs}^{(A1+R1)} = 1,12$ ,
- pre 80 km/h  $\rightarrow \delta_{obs}^{(T1)} = 1,12$ ,  $\delta_{obs}^{(R1)} = 1,10$ ,  $^{komb} \delta_{obs}^{(A1+R1)} = 1,18$ .

Najnižšie hodnoty  $\delta_{obs}$  dáva hodnotenie priebybov zo záznamov dynamického priebybu relatívnymi snímačmi ( $Ri$ ) a najvyššie hodnoty kombinovaní metóda ( $Ri+Ai$ ), čo je dôsledok určovania strednej hodnoty nestacionárneho procesu kmitania, ale aj použitými snímačmi. Dôležitý poznatok dynamických skúšok je, že pri zvyšovaní rýchlosti prejazdu nenastáva kvalitatívna zmena dynamickej odozvy – most kmitá pružne a prakticky s úplne rovnakou frekvenčnou skladbou.

2/ Frekvenčná skladba kmitania potvrdzuje, že mostná konštrukcia kmitá prevažne priestorovým kmitaním v zloženom tvare, pričom výrazne prevláda vertikálne kmitanie. Tento stav je dôsledkom výškového a smerového usporiadaniu mosta – most je výškovo aj smerovo v oblúku. Dominantné frekvencie:  $f_{(i)} = 2,55, 3,09, 3,38$ , Hz sa prakticky vyskytujú pri všetkých meraných veličinách ( $w_{(s6)}(t)$ ,  $\varepsilon_{(s6)}(t)$ ,  $\Delta w_{(s6)}(t)$ ) a majú rovnakú skladbu. Môžeme teda konštatovať, že

most kmitá superpozíciou vyšších vlastných frekvencií (nad frekvenčnými zložkami  $f_{(10)}$ ), čo zároveň potvrdzuje jeho vysokú tuhosť mostnej konštrukcie.

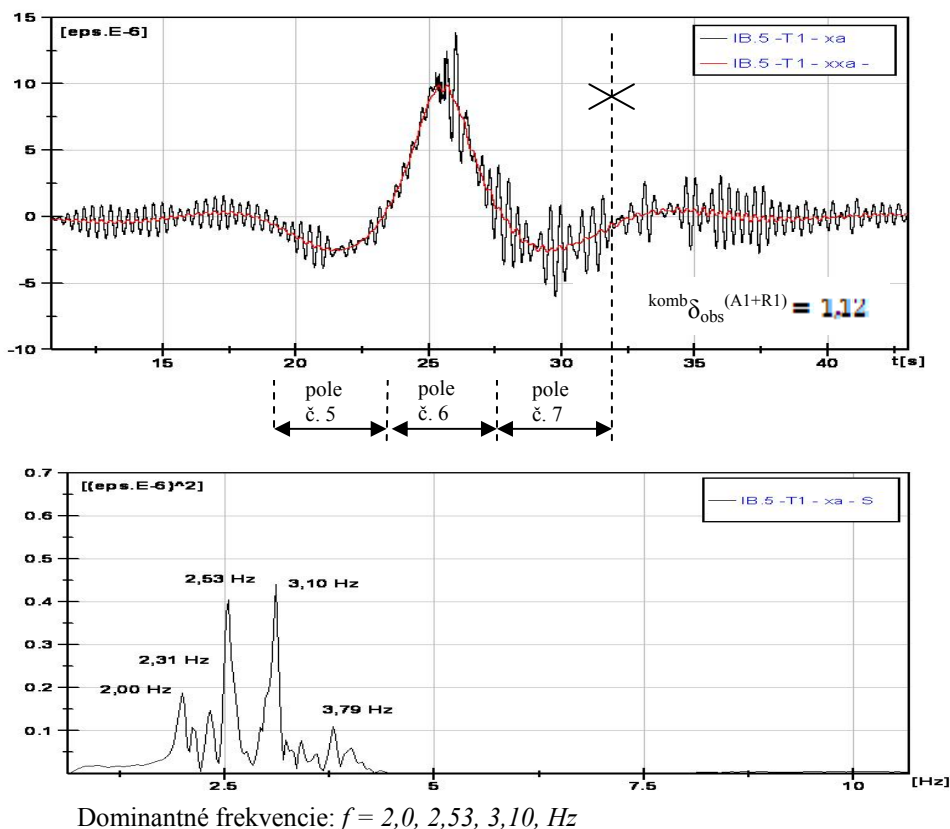
3/ Voľné dokmitávanie mosta po výjazde vozidla má tvar záznejev kmitania, čo charakterizuje existenciu blízkych vlastných frekvencií. Dominantné frekvencie dokmitávania sú  $f_i = 2,0 + 2,13$  Hz (zázneje kmitania), čo odpovedá tretiemu a štvrtému vlastnému vertikálnemu kmitaniu -  $f_{(10)} = 1,95$  Hz,  $f_{(11)} = 2,16$  Hz.

4/ Most preukazuje dostatočnú tuhosť, dobre prenáša aplikované dynamické zaťaženie – pružne kmitá s relatívne malými amplitúdami a logaritmický dekrement útlmu  $\mathcal{D}$  je veľmi nízky.

### 3.2 Prejazdy skúšobného vozidla cez normovú prekážku (N→Z)

Ide o dôležitú simuláciu vplyvu umelej nerovnosti na moste vyvolávajúce významné dynamické rázové účinky na mostnú konštrukciu. Všetky prejazdy skúšobného vozidla ( $m = 32$  t) cez normovú prekážku umiestnenú v strede v poľa č.6 (výška prekážky  $h = 60$  mm) sa realizovali ako prejazdy stredom mosta N→Z. Súbor merania sú označované ako  $I-B.j\_Xi-x$ . Charakteristická ukážka analýzy záznamov kmitania pri prejazde skúšobného vozidla cez umelú prekážku – intenzívne rozkmitávanie mosta vyhodnocované v poli č. 6 a je prezentovaná na obr.10.

- Časový priebeh dynamického pomerného pretvorenia  $\varepsilon_{(S6)}(t) \rightarrow$  tenzometer  $T_{kl}$  a jeho frekvenčná skladba - súbor  $I-B.5\_T1-x$ , rýchlosť prejazdu 50 km/h, obr.10.



Obr. 10 Analýza súboru súbor  $I-B.5\_T1-x$  – Pomerné pretvorenie  $\varepsilon_{(S6)}(t)$  – stred 6. poľa a jeho frekvenčná skladba

Hlavné výsledky prejazdov skúšobného ťažkého vozidla hmotnosti  $m=32$  t cez normovú prekážku možno zhrnúť nasledovne:

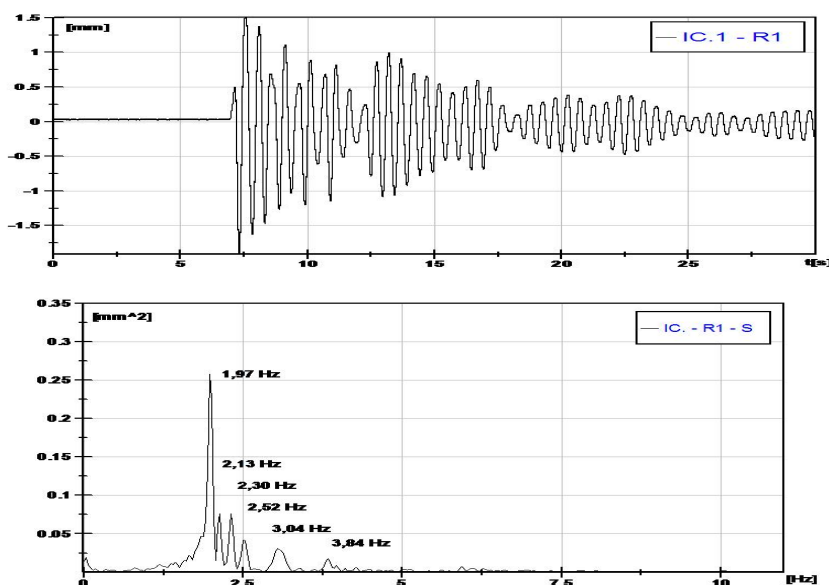
1/ Dynamický súčiniteľ  $\delta_{obs}$  vyhodnocovaný z merania troch nezávislých veličín v charakteristických prierezoch poli mosta ( $w_{(s6)}(t), \varepsilon_{(s6)}(t), \Delta w_{(s6)}(t)$ ), dáva výrazne vyššie hodnoty ako pri hladkých prejazdoch. Napríklad pre rýchlosť prejazdu 50 km/h  $\rightarrow \delta_{obs}^{(T1)} = 1,40$ ,  $\delta_{obs}^{(R1)} = 1,42$ ,  $^{komb} \delta_{obs}^{(A1+R1)} = 1,54$ .

Z porovnania meraných dynamických súčiniteľov  $\delta_{obs}$  pre jazdu cez prekážku a hladké prejazdy v poli č. 6 s umiestnenou prekážkou vyplýva, že dynamické účinky sú zväčšené o 27% ÷ 31% (pre kombinovaný súčiniteľ  $^{komb} \delta_{obs}^{(A1+R1)}$  až o 37%). V poli č. 7 (pole za prekážkou) je tento pomer len 2%. Teda dynamické zväčšenie je výrazné len v poli s prekážkou a v ostatných poliach dosahujú amplitúdy kmitania hodnoty zrovnateľné s hladkými prejazdmi vozidla.

#### 4 RÁZOVÉ SKÚŠKY MOSTA – RÁZ ZADNOU NÁPRAVOU SKÚŠOBNÉHO VOZIDLA

Komplexné poznania dynamickej odozvy mostnej konštrukcie významne objasňuje rázové zaťaženie mosta. Na našom pracovisku aplikujeme jednoduchú, ale účinnú skúšku rázom zadnej nápravy skúšobného vozidla Mercedes Benz (hmotnosť 32 t) (hmotnosť zadnej nápravy  $m_{v2} = 16,2$  t) aplikovanú v strede 6.pola. Charakteristické voľné kmitanie mosta po ráze je prezentované na obr. 11.

- Časový priebeh dynamickej zložky vertikálneho kmitania mosta  $\Delta w_{(s6)}(t)$  vyhodnocovaný v strede pola č.6, súbor *I-C.1-R1-x* a jeho frekvenčná skladba  $\rightarrow$  voľné dokmitávanie mosta po ráze, obr.11.



Dominantné frekvencie:  $f = 1,97$ , Hz

Obr. 11: Voľné dokmitávanie mosta po ráze v poli č.6

- Hlavné výsledky kmitania mosta pri rázovej skúške možno zhrnúť:

- Frekvenčná skladba voľného dokmitávania mosta po ráze má tvar záznejového kmitania, ktoré je znakom periodicky sa opakovanej zmeny amplitúdy kmitania vznikajúceho skladaním dvoch alebo viacerých harmonických zložiek kmitania s málo líšiacimi frekvenčnými zložkami.

- Frekvenčná skladba vertikálneho kmitania mosta v poli č. 6 (v mieste rázu) má dominantnú frekvenciu kmitania:  $f^* = 1,97 \text{ Hz}$  a rad vyšších frekvenčných zložiek  $f = 2,13, 2,30, 2,52, 3,04 \text{ Hz}$ , čo odpovedá charakteristickému impulzovému zaťaženiu. Porovnanie teoretickej frekvencie  $f_{(10)}^{teor} = 1,95 \text{ Hz}$  s experimentálne meranou  $f_{obs}^* = 1,97 \text{ Hz}$  vyplýva, že dominantná frekvencia vertikálneho kmitania mosta sa zhoduje s frekvenciou  $f_{(10)}$ .

## 5 ZHODNOTENIE DYNAMICKEJ SKÚŠKY MOSTA

Dynamická odolnosť nosnej konštrukcie vykazovala pri všetkých prejazdoch skúšobného vozidla - pri hladkých prejazdoch alebo prejazdoch cez normovú umelú prekážku dobrú odolnosť predpokladanú statickým výpočtom.

- Amplitúdy kmitania v meraných poliach č. 6 a č. 7 pri hladkých prejazdoch dosahovali nízke hodnoty a dynamické súčinitele  $\delta_{obs}$  dosahovali hodnoty v medziach  $\delta_{obs} = 1,04 \div 1,12$ .

- Amplitúdy kmitania v meraných poliach č. 6 a č. 7 pri prejazdoch cez umelú prekážku dosahovali vysoké dynamické priehyby (hodnoty zvýšene až o  $\approx 100 \%$ ), čomu odpovedali aj vysoké dynamické súčinitele  $\delta_{obs} = 1,32 \div 1,52$ .

## POĎAKOVANIE

Príspevok bol vypracovaný za finančnej podpory Grantovej agentúry VEGA MŠ SR – registračné číslo projektu 1/0517/12.

## LITERATÚRA

- [1] Pracovný program dynamickej zaťažovacej skúšky mosta Selenec – Beladice, Objekt 203. Žilinská univerzita v Žiline, august 2011.
- [2] SHP s.r.o: Pracovný program pre statickú zaťažovaciu skúšku - Objekt SB-203, Brno, jún 2011.
- [3] STN 73 6209: Zaťažovacie skúšky mostov, 1979.

## Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Juraj Králik, PhD., Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta, STU v Bratislave.

Doc. Ing. Alexander Tesár, DrSc., Ústav stavebníctva a architektúry, Slovenská akadémia vied.